

# **Una metodología para el estudio de la maquinabilidad de aleaciones de aluminio-cobre**

**Félix Calvo Narváez**

UPM University, Madrid, Spain, felix.calvo@upm.es

**Carlos Rodríguez Monroy**

UPM University, Madrid, Spain, crmonroy@etsii.upm.es

## **ABSTRACT**

The machinability of materials is one of the factors that make us wonder what tools to use and what material is best suited for a particular cutting tool and which process is more efficient in the production of a component. In the case of parts for the aerospace industry, manufacturing processes assume greater importance due to the extreme demands on reliability and quality. Although today composites are used in a high percentage of aircraft components, they suffer from the problem of recycling. By contrast, the aluminum alloys fulfill the environmental requirements, besides being lightweight. The machinability of steels has been extensively studied, but this has not happened in the case of aluminum alloys. This paper presents a methodology for characterizing aluminum alloys from the point of view of its machinability, enabling senior students to make their final projects, comparing different alloys for aeronautical use. To obtain the characteristics in each alloy, students must handle a wide range of equipment: Durometer, scales, SEM microscopy, optical microscopy, lathe machine, etc, increasing their education and training.

**Keywords:** Machinability, aluminum alloys, aeronautics, cutting tools, methodology

## **RESUMEN**

La maquinabilidad del material es uno de los factores que nos hace cuestionar qué herramientas utilizar y qué material es más adecuado para una determinada herramienta de corte, incluso qué proceso resulta más eficiente en la fabricación de un componente. En el caso de piezas para la industria aeronáutica, los procesos de fabricación adquieren una mayor relevancia debido a la extrema exigencia en fiabilidad y calidad. Aunque hoy día se usan materiales compuestos en un porcentaje elevado de componentes aeronáuticos, éstos presentan el problema de su reciclado. Por el contrario, las aleaciones de aluminio cumplen con los cánones medioambientales, además de ser ligeras. La maquinabilidad de aceros ha sido ampliamente estudiada, pero no ha sido así en el caso de las aleaciones de aluminio. El artículo presenta una metodología para caracterizar las aleaciones de aluminio desde el punto de vista de su maquinabilidad, y que permita a los alumnos de último curso realizar sus proyectos fin de carrera, comparando distintas aleaciones de uso aeronáutico. Para la obtención de las características en cada aleación, los alumnos deben manejar una amplia variedad de equipos: durómetros, básculas, SEM, microscopio óptico, torno, etc., lo que incrementará su formación y adiestramiento.

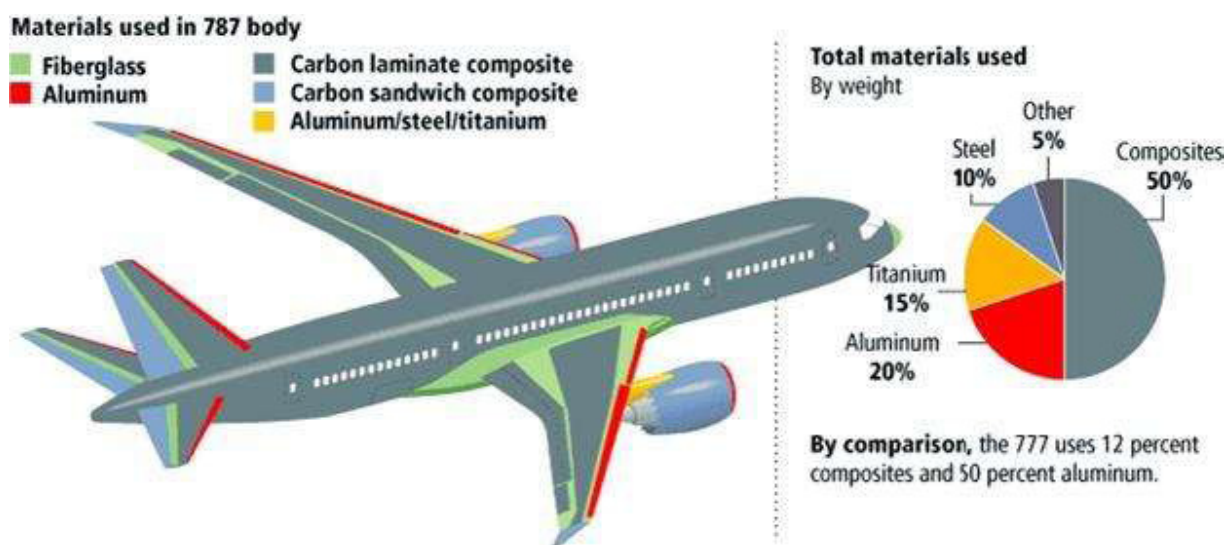
**Palabras claves:** Maquinabilidad, aleaciones de aluminio, aeronáutica, herramientas de corte, metodología

## **1. INTRODUCCIÓN**

La importancia del peso en una aeronave es fundamental a la hora de reducir el consumo, disminuir los esfuerzos debidos a las fuerzas de inercia máxicas, mejorar la estabilidad dinámica, etc. El peso debe ser contrarrestado por la fuerza sustentadora generada en el avión, y cuanto menor sea el peso también hará falta menos empuje en los motores para conseguir la sustentación necesaria. El empleo de aleaciones de aluminio en la estructura de la

aeronave permite aligerar su peso, y dedicar el ahorro en peso a aumentar la carga útil, sin modificar el empuje de los motores. Estos materiales no sólo son interesantes por sus propiedades másicas, sino por su gran resistencia a la corrosión, lo que le hace idóneo para aplicaciones marítimas y aeronavales. Estas aleaciones además ofrece una excelente conductividad térmica y eléctrica, lo que le hace útil en motores eléctricos de alto par, cables de alta tensión, intercambiadores de calor, evaporadores, etc., y son particularmente adecuadas para partes y estructuras que requieren una alta relación resistencia-peso, como fuselajes de aviones, revestimientos del ala, trenes de aterrizaje y partes estructurales que requieran soportar temperaturas de hasta 150 °C.

En la Figura 1 se puede apreciar el contenido de aluminio de un avión comercial B-787 en comparación con un B-777. Se puede observar que el aluminio se utiliza en un 20% de la aeronave, frente al 50% empleado en el B-777. Se observa que los materiales compuestos son cada vez más utilizados, pasando de tener un 12% en peso en el B-777, a un 50% en el B-787. No obstante, los materiales compuestos presentan un problema, que es la dificultad para ser reciclados, sobre todo cuando aparecen compuestos de matriz termoestable. Las aleaciones de aluminio tienen la virtud de poderse reciclar y cumplir con los requisitos medioambientales.



**Figura 1: Evolución de los materiales utilizados en una aeronave comercial**

Las preformas de aleación de aluminio deberán ser mecanizadas para lograr las especificaciones dimensionales y geométricas que se detallan en los planos. Es aquí donde aparece el concepto de maquinabilidad.

Se pretende analizar y evaluar la maquinabilidad de una aleación de Al-Cu mecanizada en torno mediante el caudal de viruta y análisis microscópico y dimensional de la herramienta de corte. También se estudiará el posible desgaste de la herramienta, y qué factores han podido aumentar o disminuir dicho valor. Para conseguirlo se han mecanizado ocho barras extruidas de una aleación de aluminio-cobre 2030 T4, para lo que se ha utilizado dos vidias de carburo de wolframio con recubrimiento de nitruro de titanio. El proceso seguido ha sido el de cilindrado en torno. Tras cada mecanizado se han realizado medidas de dureza para comprobar si, en algún caso, se ha producido una alteración apreciable en las propiedades del material. Además se han pesado todas y cada una de las muestras mecanizadas para medir así el volumen de material arrancado en la unidad de tiempo. Posteriormente cada vidia se ha analizado mediante microscopia SEM (Scanning Electron Microscopy) para determinar la composición de las mismas, y dimensionar los efectos que ha podido producir el mecanizado.

## 2. MAQUINABILIDAD

Se puede definir la maquinabilidad como la aptitud o capacidad de los materiales metálicos para dejarse conformar por arranque de virutas con cuchillas de corte, mediante una máquina herramienta. Esta característica cuantifica el proceso de mecanizado y puede ser definida para una aplicación específica mediante varios criterios,

como el tipo de material y la geometría de la herramienta de corte, la operación y condiciones del mecanizado, la lubricación durante el mecanizado, y un largo etcétera que depende de estos últimos factores.

Tomando como referencia el artículo de ASM Metals Handbook, “*Machinability Test Methods*”, Vol. 16, el concepto de índice de maquinabilidad es un número asignado para indicar la facilidad o dificultad en el mecanizado de materiales, que fué introducido cuando las herramientas de acero rápido superior (High Speed Steel, HSS) dominaban el mercado. A la vida de la herramienta obtenida en el torneado de un acero B1112 con una herramienta de HSS a velocidad de corte de 55 m/min, le fué asignado un valor del 100%. Los índices de maquinabilidad fueron asignados a otros materiales basados en la pertinente vida de la herramienta, cuando se mecanizaron esos materiales en las mismas condiciones de corte, con herramientas de acero rápido superior. En definitiva, se tomó un índice de maquinabilidad 1, como valor de referencia, para el mencionado acero, y posteriormente se comparan los demás materiales con este índice, considerando que los materiales con mejor maquinabilidad deben tener un índice mayor que la unidad, y los que sean más difíciles de mecanizar deben tener un índice inferior a la unidad. Una aleación 2024 T4 tiene un índice de maquinabilidad de 1.5, mientras que la familia de superaleaciones austeníticas de Inconel, cuya base es níquel-cromo, pueden llegar a tener un índice de tan sólo 0.09, lo que supone una maquinabilidad de sólo un 9% con respecto al acero B1112.

El desarrollo de nuevas herramientas de corte y materiales trabajados, junto a una gran variedad de geometrías de los rompevirutas colocados en el plano de desprendimiento de la viruta, ha complicado ésto en cierto modo.

## 2.1 OTROS FACTORES

Son de sobra conocidas las expresiones de la vida de la herramienta en función de la velocidad de corte, y de otras variables de corte, como la conocida ecuación de Taylor que relaciona exclusivamente la vida de la herramienta con la velocidad empleada durante el mecanizado. Estas expresiones son funciones matemáticas del tipo potencia con exponentes constantes, que al llevarlas a un gráfico logarítmico proporcionan rectas de pendiente negativa. En el caso de la ecuación de Taylor:  $\log V + n \cdot \log T = \log C$ , siendo: V, la velocidad de corte en m/min.; T, la vida de la herramienta en min.; n, una constante que depende de la herramienta de corte, y C la velocidad de corte que desgasta la herramienta al cabo de un minuto de corte. Se observa que si se quiere utilizar la herramienta durante más tiempo será necesario que la velocidad de corte empleada sea menor, y así el desgaste será inferior. El índice de maquinabilidad también está influenciado por la dureza del material, la composición química del material, la microestructura, la resistencia a tracción, el endurecimiento por la conformación en frío y el proceso de fabricación. De esta forma, la selección del material a mecanizar es un factor importante a la hora de trabajar. Cuando se mecanizan aceros, su dureza es a menudo percibida como una medida relativa de su maquinabilidad: cuanto más duro, menos maquinable es el material. No obstante, aceros con bajo contenido en carbono son más viscosos, y tienden a generar filo recrecido (Built-Up Edge, BUE) en la arista de la herramienta por donde se desprende la viruta, resultando un índice de maquinabilidad menor de lo esperado. Además pequeñas adiciones de azufre o fósforo pueden mejorar significativamente este factor. Por tanto, la composición química resulta igualmente importante al estimar la maquinabilidad. Por otra parte, la microestructura también influye en la determinación de la maquinabilidad, pues aspectos como la dureza, la resistencia a tracción y diversas propiedades del material se ven influidas por la disposición interna de las redes cristalográficas.

## 3. METODOLOGÍA

Ya se ha explicado que los alumnos pueden elegir este tema para realizar su trabajo fin de carrera. Es por ello que deben justificar su elección de material dentro del conjunto de aleaciones de aluminio-cobre. Hemos elegido para dar los primeros pasos la aleación 2030 T4 (Norma EN AW-2030), que tiene una densidad media de 2.79 Kg/m<sup>3</sup>. Vamos a explicar las cualidades que presenta esta aleación y cómo se comporta en operaciones de mecanizado. Según Alu-Stock, que fué el proveedor elegido para suministrar las barras de este material, la composición real de esta aleación es: 0.531% Si, 0.690% Fe, 3.487% Cu, 0.648% Mn, 0.535% Mg, 0.046% Cr, 0.263% Zn, 0.039% Ti, 0.130% Bi, 0.862% Pb, y el resto de aluminio. También proporcionó los % máximos de cada uno de los elementos anteriores, y los valores mínimos para Cu (3.3%), Mn (0.2%), Mg (0.5%) y Pb(0.8%). Esta aleación tiene alta resistencia a la tracción (el valor mínimo es de 370 MPa), por lo que está indicada en aplicaciones que

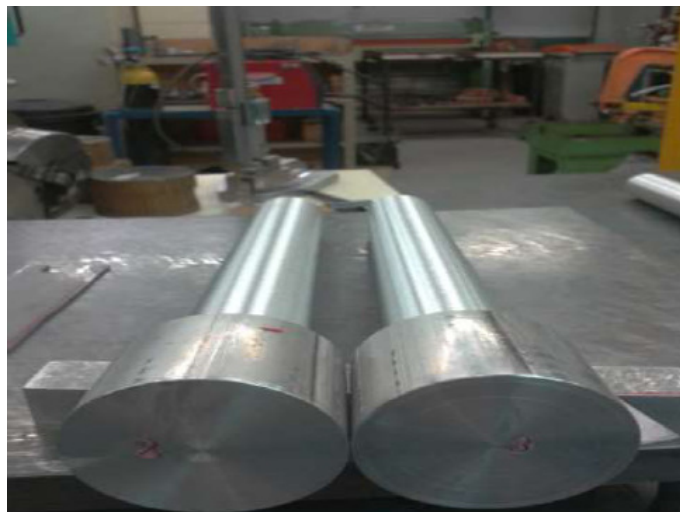
requieran altas características mecánicas, como en cilindros y pistones hidráulicos. Se está empezando a sustituir debido a su alto contenido en plomo (más del 0.4%), por la aleación 2017A. El proveedor recomienda su uso en operaciones a altas velocidades, con alto rendimiento y un desprendimiento de viruta excelente. Además presenta una moderada resistencia a la corrosión, por lo que se recomienda una anodización de las piezas terminadas.

Se realizó un análisis previo al material y se detectaron pequeñas variaciones en la composición con relación a los datos proporcionados por el fabricante.

La maquinabilidad de la aleación se puede determinar mediante ensayos en los que se comparen algunos de los siguientes parámetros: vida de la herramienta, desgaste de la herramienta, acabado superficial, fuerza de corte necesaria, potencia consumida en el mecanizado, volumen de material arrancado, etc. La norma donde se desarrolla este concepto, para el caso de aceros, y que sirve de referencia en el caso de las aleaciones de aluminio, que no tienen una norma específica, es la ISO 3685:199, titulada: “Tool-Life testing with single-point turning tools”. Se ha considerado un buen punto de partida la determinación de la maquinabilidad a partir de la comparación con parámetros sencillos, como el caudal de viruta arrancado, o la potencia específica de corte (potencia consumida en la operación dividido del caudal). Este último parámetro coincide teóricamente con la presión de corte en el material. En nuestro artículo sólo hemos puesto los datos correspondientes al caudal.

Son objeto de estudio durante el proceso de mecanizado las características del material, de la herramienta y considerando la influencia de las condiciones de corte fijadas en la operación de cilindrado.

Las ocho barras de aleación 2030 T4 tienen un diámetro inicial de 50 mm. Las dos herramientas de corte utilizadas son de carburo de wolframio, con alta resistencia al desgaste, y alta dureza incluso en caliente, baja tenacidad, con capacidad de trabajo a altas velocidades y seis filos por herramienta. La Figura 2 muestra el estado de las barras 2 y 3 tras realizar sobre ellas las terceras pasadas a diámetros finales de 32 mm (ensayo C desde diámetro 38 mm).



**Figura 2: Barras mecanizadas en torno correspondientes a los ensayos C2 y C3**

Los equipos empleados son: Torno Harrison V390 de 10 C.V., SEM (microscopio electrónico de barrido), báscula monoplato Kern EW, báscula analítica de precisión, durómetro Rockwell Centaur, microscopio óptico Wolpert con software Kappa, pie de rey, cronómetro, software Image J y GIMP.

Se realizaron 12 ensayos y otras 12 repeticiones de los mismos. Cada 2 mecanizados se cambió el filo de la herramienta. De los 12 ensayos, 6 se realizaron a velocidad de corte constante de 63 m/min., y 6 ensayos a 94 m/min., siendo la profundidad de corte de 3 mm en todos los casos, y en cada uno de los 6 ensayos a velocidad de corte constante, se hicieron 3 ensayos con avance por revolución de 0.1 mm y otros 3 ensayos con 0.18 mm. Las condiciones reales fueron algo distintas, debido a la difícil regulación de la velocidad de giro de la máquina (N, en

r.p.m.), y al propio operario. Las Tablas 1, 2 y 3 adjuntas reflejan los valores de N reales y los valores de la velocidad de corte reales conseguidos, para los tres ensayos considerados (A, B y C), en función del diámetro de partida de las 8 barras. El error relativo tanto en el valor de la velocidad de giro real, N, como en el valor de la velocidad de corte real, V, han sido inferiores al 1% en todos los casos, salvo en las 2 primeras barras del ensayo A, que han llegado al 1.25 y 1.63% respectivamente.

**Tabla 1: Ensayos A (diámetro inicial 50 mm)**

<b>Nmedia (rpm)</b>	<b>V (m/min)</b>
405	63.62
407	63.85
404	63.38
401	62.91
602	94.56
604	94.88
602	94.56
600	94.17

**Tabla 2: Ensayos B (diámetro inicial 44 mm)**

<b>Nmedia (rpm)</b>	<b>V (m/min)</b>
454	62.69
456	62.96
456	63.03
455	62.89
689	95.17
684	94.55
683	94.41
683	94.41

**Tabla 3: Ensayos C (diámetro inicial 38 mm)**

<b>Nmedia (rpm)</b>	<b>V (m/min)</b>
527	62.91
527	62.85
527	62.85
524	62.56
795	94.91
793	94.61
796	94.97
793	94.61

Los ensayos A se realizaron los 4 primeros a 400 rpm teóricas, y los 4 segundos a 600 rpm teóricas, y a su vez en los 4 primeros, los 2 iniciales se hicieron con avance, a, de 0.1 mm, y los 2 últimos con avance de 0.18 mm, repitiéndose estas alternativas para los 4 segundos ensayos a 600 rpm. Los ensayos B se realizaron los 4 primeros a 455 rpm teóricas, para lograr una velocidad de corte constante, y los 4 segundos a 682 rpm teóricas, siguiendo la misma pauta de modificación que se ha expresado en los ensayos A. Los ensayos C se realizaron los 4 primeros a

526 rpm teóricas, para lograr mantener la velocidad de corte constante, y los 4 segundos a 790 rpm teóricas, siguiendo la misma pauta de modificación de los avances,  $a$ , que se ha descrito en los ensayos A. La profundidad de corte en todos los ensayos se ha mantenido constante en 3 mm.

Cada filo de la herramienta se ha mantenido en dos mecanizados sucesivos, por lo que se ha supuesto que el previsible desgaste de la herramienta, en el plano de desprendimiento de la viruta, tras cada mecanizado se correspondía con la mitad del desgaste total de la herramienta medido. Los tiempos empleados en cada mecanizado han sido medidos con cronómetro. Tras cada mecanizado se recogió en una bolsa de plástico la viruta para su posterior pesado en la báscula, y cada barra se pesó y se determinó su dureza superficial, siempre en un intervalo de tiempo inferior a la media hora tras su mecanizado. Con los volúmenes de material arrancado (peso dividido del peso específico,  $2.79 \text{ Kg/m}^3$ ) y los tiempos de mecanizado se pueden calcular los caudales reales de viruta arrancados, y así se obtienen los caudales reales que van de  $109.905$  a  $82.260 \text{ cm}^3$ , en lugar de los valores teóricos que van de  $117.81$  (ensayos A) a  $89.535 \text{ cm}^3$  (ensayos C). Cada dos mecanizados se cambió el filo de la herramienta de corte, y se llevó al microscopio para analizar el desgaste en el plano de desprendimiento, donde se hizo uso de los software Image J y GIMP.

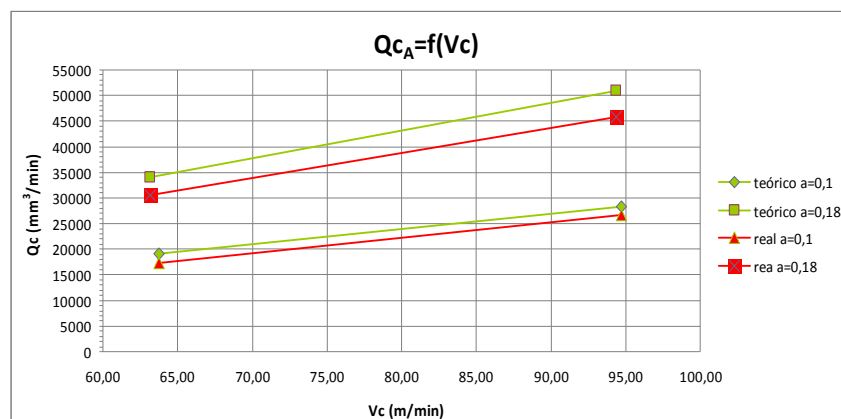
Los valores del caudal medidos deberán compararse ahora con los obtenidos en la aleación de referencia, para las mismas condiciones de corte, y con la misma herramienta. Cuando los valores de nuestra aleación sean superiores a los logrados con la aleación de referencia significará que la aleación ensayada tiene mejor maquinabilidad, y viceversa.

#### 4. RESULTADOS

No se han apreciado variaciones significativas en la dureza de la aleación tras realizar las operaciones de mecanizado.

Respecto al peso, a velocidad de corte constante se observa que al aumentar el número de revoluciones por minuto,  $N$ , el material arrancado en la unidad de tiempo,  $Q_c$ , es menor (Figuras 3 y 4). Cuando se realiza la repetición de los ensayos hay variación en los pesos obtenidos debido a que no se consiguen repetir los valores de  $N$ .

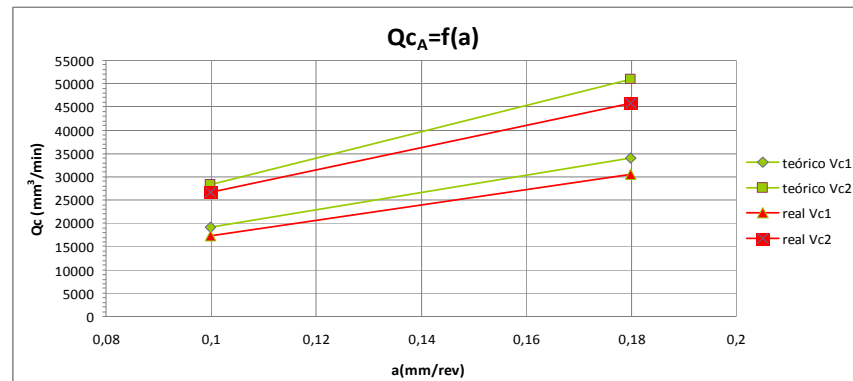
Los valores logrados para la rugosidad dan una calidad  $N7/N8$ , que se corresponden con las operaciones de desbaste en un torno de estas características, y que no ha sido muy utilizado. Las variaciones de  $N$  permiten acabados aceptables durante el mecanizado.



**Figura 3: Curvas de caudal de material arrancado en función de la  $V$ , con parámetro el avance**

Las formas de las virutas son diversas en función de las condiciones de corte empleadas. Así, se obtienen virutas continuas en los dos ensayos con velocidad de corte y avance más pequeños, y virutas más fragmentadas en el resto de ensayos, apreciándose en todos los ensayos la aparición de filo recrescido. La longitud de las virutas

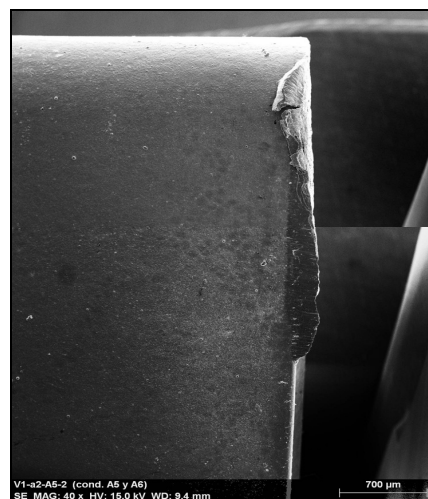
obtenidas y el espesor de las mismas están de acuerdo con los valores que salen al aplicar la teoría del corte de metales. El caudal de viruta obtenido teóricamente difiere del que sale al aplicar la teoría del corte, y que es el resultado de multiplicar la velocidad de corte por el avance por vuelta y por la profundidad de corte. Ésta desviación se debe sin duda a que existen variaciones de las condiciones de corte durante el proceso.



**Figura 3: Curvas de caudal de material arrancado en función del avance  $a$ , con parámetro  $V$**

Del estudio macroscópico de la herramienta se deduce con una inspección visual, que aparece filo recrecido, y éste provoca un aumento de peso en la herramienta. Además al medir la alta dureza de la herramienta en HV 100, no se aprecia una variación significativa de la misma, al variar entre 1547 y 1570 (61 a 65 HRB).

Del estudio microscópico del recrecido en el filo de la herramienta de corte se observa que aumenta de forma directa con la velocidad de giro,  $N$ , y que la longitud de adhesión de la viruta oscila entre 3 y 9 mm, según las condiciones de corte, con una longitud total del filo de 16 mm. La Figura 4 muestra el filo recrecido, obtenido con SEM.



**Figura 4: Filo recrecido en la cara de desprendimiento de la herramienta**

## 5. CONCLUSIONES

Se puede pensar en una buena maquinabilidad de la aleación estudiada, pero para hallar el índice de maquinabilidad es necesario realizar los ensayos siguiendo los estándares normalizados disponibles para aceros, ya que no se dispone de una norma con estándares para aleaciones de aluminio.

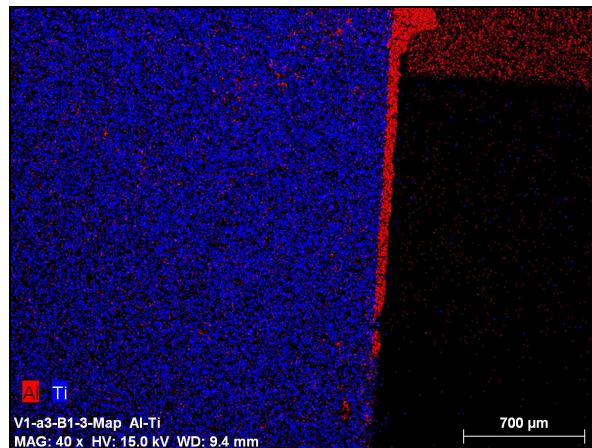


La huella de desgaste en la cara de desprendimiento de la herramienta no se ha podido determinar (Figura 5), debido en parte a que se han realizado pocos ensayos (dos mecanizados por cada filo de la herramienta), y también debido a que la herramienta es muy dura mientras la aleación es dúctil. Convendría poner unas condiciones de corte más severas, o colocar una herramienta de menor dureza para esta aleación.

Por otra parte, se evidencia la necesidad de emplear una máquina herramienta con una regulación de velocidades de giro más sensible, así como realizar un número superior de ensayos para obtener valores medios y desviaciones típicas que proporcionen una significación estadística superior a los resultados obtenidos, así como disponer de materiales de contraste con la aleación ensayada. En este sentido parece razonable que la aleación de referencia elegida como patrón sea la 2024 T4, que se menciona en la norma de aceros, y muy utilizada en la industria aeronáutica. Esta aleación será objeto de los próximos ensayos que realicemos.

Se ha empleado el volumen de viruta arrancado en la unidad de tiempo como parámetro para medir la maquinabilidad, pero igualmente hemos determinado la potencia específica o la presión de corte. Con esta información no podemos obtener el índice de maquinabilidad, si bien son determinantes para hacer una comparación eficaz entre aleaciones.

Se ha definido una metodología capaz de caracterizar las aleaciones de aluminio-cobre para uso aeronáutico, desde el punto de vista de su maquinabilidad que permite, a los alumnos de último curso de carrera, desarrollar sus trabajos manteniendo la repetibilidad de sus ensayos y el rigor científico de sus conclusiones.



**Figura 5: No se produce desgaste apreciable en la cara de desprendimiento de la herramienta**

## REFERENCIAS

- ASM International Handbook Committee (1990). "Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys: Aluminum Alloys". *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International.
- ASM International Handbook Committee (1989). "Machinability Test Methods". *Machining Processes*, Vol. 16, pp.643. ASM International.
- Callister, W.D. (2009). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Limusa Willey, México.
- SECO España. (2012). Servicio y soporte/Machining Navigator. HYPERLINK, [http://www.secotools.com/CorpWeb/Spain/Catalogos/MN2012/Turning%202012\\_ES\\_LR.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Spain/Catalogos/MN2012/Turning%202012_ES_LR.pdf), 12/17/13.

## Authorization and Disclaimer

*Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.*